

スペクトラム拡散通信方式における同期捕捉，保持に関する研究

その他（別言語等） のタイトル	Code Moduration Techinique in Spread Spectrum Communication
著者	一柳 和弘，黒島 利一，杉岡 一郎，秋山 稔
雑誌名	室蘭工業大学研究報告．理工編
巻	38
ページ	107-122
発行年	1988-11-10
URL	http://hdl.handle.net/10258/759

スペクトラム拡散通信方式における同期捕捉，保持に関する研究

一 柳 和 弘・黒 島 利 一・杉 岡 一 郎・秋 山 稔

Code Modulation Technique in Spread Spectrum Communication

Kazuhiro ICHIYANAGI, Toshikazu KUROSHIMA,

Ichiro SUGIOKA and Shigeshi AKIYAMA

Abstract

The modulation technique in the spread spectrum communication usually includes the process to modulate the carrier signal by means of ASK, PSK or FSK as the primary modulation, and then primary modulated signals are spreaded by the use of pseudo-noise(PN) code as the secondary modulation.

In spread spectrum communication techniques, the PN code synchronization is a very important problem to establish the communication channels, so that a great many techniques has proposed concerned with it. In the case of digital data transmission system, a modulation technique which is called code modulation may be proposed in this paper. The modulation method include the procedure to multiply the PN code and data signal as the primary modulation, and then carrier signal is spreaded using that newly produced spread signal. The advantage of the code modulation is easy to establish the PN code synchronization.

This paper describes on a experimental system using the circuit to process the carrier and the clock for PN code generator in phase. In conclusion, from results of the transmission test using its system, we found that our newly developed synchronization circuit is reliable for the spread spectrum communication system to transmit digital signals.

1. はじめに

最近，特に注目されつつある通信方式にスペクトラム拡散（Spread Spectrum, 以下 SS と略記）通信方式¹⁾⁻⁷⁾がある。この SS 通信方式は，従来の通信方式のような狭帯域化指向とは反対に，情報帯域幅とは独立な拡散符号^{8),9)}を用いて広帯域化することにより，信号電力が低くても情報伝送を可能とするのである。

SS 通信方式には，雑音に強く，秘匿性に優れている等のほかに，符号分割多重によりランダム・アクセスが可能等の特徴があり，SS 通信方式をパソコン間のデータ通信へ利用したローカル・エリア・ネットワーク（LAN）あるいは電燈線による情報伝送システム等の構築に関する研究がされている。その際，問題となっていることに同期がある。ここでいう同期とは，SS 通信方式における拡散符号に関する同期のことであり，この同期がとれなければ，通信内容を伝送することはできず，安定な同期が必要不可欠である。

本研究は、この同期問題の解決に向け、SS 通信システムにおいて現在では最も多く使用されている相関をとり位相差を検出することで、同期をとる方式について検討、及び回路の作製を行ったので報告する。

2. 同 期

SS 通信では同期がとれないと通信相手と接続ができず単なる雑音となり、又、同期が安定に保持されないと通信内容が伝達されないという弱点を持っている。即ち、与えられた条件下で如何に速く同期を捕捉し、それを保持し続けるかということが、SS 通信において最も重要な問題となる。

2.1 同期捕捉^{10), 11)}

非同期状態から送受信間の PN (Pseudo Noise) 符号系列のフレーム (PN 符号パターンの一周期分) の時間ずれを一致させること、即ち、非同期状態から符号の位相を合わせ、同期状態にすることを同期捕捉 (initial synchronization, 又は、初期同期) という。同期捕捉には同期信号挿入方式や整合フィルタを用いる方式等があるが、ここでは本研究で用いたスライディング相関器について述べる。

スライディング相関器 (sliding correlator) は最も単純な同期方式である。図-1 はその動作の流れを示したものである。受信側のクロック周波数にオフセットを与え、受信側の PN 符号系列をスライドさせて送受信間の両方の PN 符号の相対位相をずらし、相関値を調べる。予め設定したしきい値を越えるレベルの相関値が得られると、PN 符号系列の位相が合ったものとしてサーチを停止する。この方法の欠点はしらみつぶしにサーチするので、同期捕捉に最大 1 フレーム分をサーチする必要がある、長い符号系列を使用すると時間が長くなることである。この克服法として、1 フレーム内のスリッピング範囲を幾つもの小区間に分割して並列処理する方法や同期の為にサーチに要する時間が実用的な範囲に収まるようなプリアンプル (preamble) と呼ば

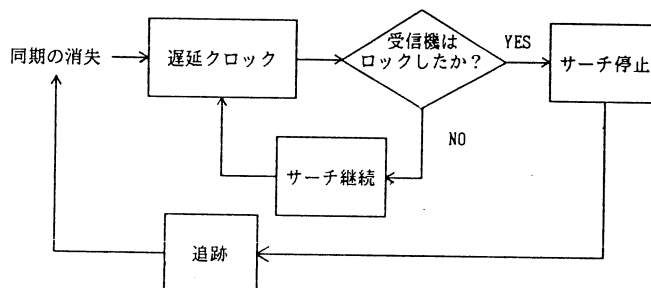


図-1 スライディング相関のフロー・ダイアグラム

れる短い特殊な符号を挿入する方法がある。又、高速同期捕捉用の合成符号系列に関する研究も進められており、JPL 系列や縦列接続系列、非同期線形合成符号等が提案されている。

2.2 同期保持

通信システムにおいて、周波数源の安定性が希望通りに十分であるとは限らず、周波数の不安定性が問題となる。即ち、クロック速度のオフセットは符号位相のオフセットとして累積されてゆく。このような周波数の不安定性を避けることはできず、同期捕捉に成功した後、局部基準信号のクロック速度が入力符号系列のクロック速度を追跡して同期を保持する必要がある。

DLL (Delay Lock Loop) は同期保持の方法として最も代表的なもので、本研究においてもこの方法を使用している。そのブロック図を図-2 に示す。DLL は相等しいが一方が他方よりも遅

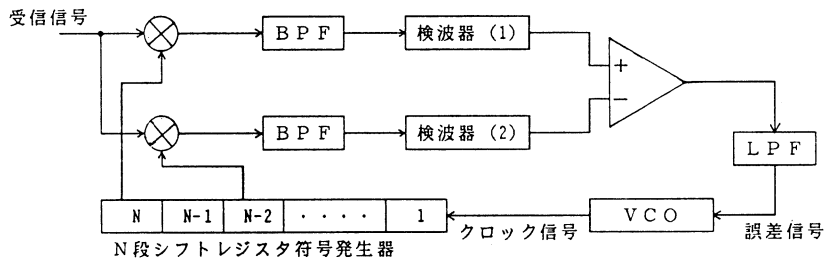


図-2 DLL の構成図

延している局部基準符号系列を2つの相関器に入力し、その相関出力の差を取り、VCOの制御電圧として用いることで符号系列発生速度を変化させ、追跡する方法である。2ビット差のある局部基準符号系列を使用した場合、それぞれの相関検出器は、図-3(a)、(b)に示すように、2ビット幅の三角形の相関出力を持ち、両方とも同じ形ではあるが遅延量だけずれている。その差を取ったものは、

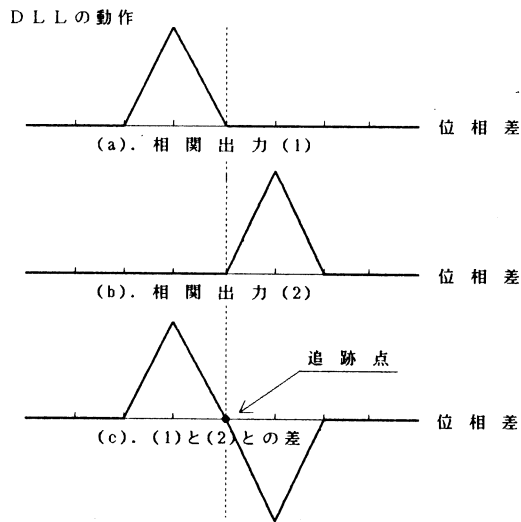


図-3 DLL の動作説明図

図-3(c)に示すような双ピーク三角形形状の合成相関関数となり両ピークの中点を挟んで相関関数が線形である部分が存在する。したがって、相関器の出力の差を取って得られた電圧制御発振器の制御信号は、局部基準符号系列と入力符号系列の位相差により、図-3(c)のような形をとることになり、両ピークの中点に追跡点が安定するように働く。ここに挙げたものは遅延量を2ビットとしたものだが、遅延量を1ビットとし、1/2ビットだけ遅延した符号系列を第三の相関器に入力して復調信号を得る方法もある。

3. システムの構成

3.1 システム全体の構成

本システムはパソコンによる通信を目的としており、全体の構成は、図-4に示すように、パソコン2台、モデム2台、及びSS変調器、SS復調器及び同期回路からなっている。SS変調方式は、構成が簡単である直接拡散方式とした。

パソコンは富士通FM-11AD2を用い、RS-232Cインターフェイスを介して通信を行う。パソコンは1台を送信専用、1台を受信専用とし、単方向通信で実験を行い、伝送速度は1200bpsとした。表-1に、実験システムの仕様をまとめた。

3.2 送信側の構成

送信側パソコンから出力されたデータ信号は、一次変調としてFSK(Frequency

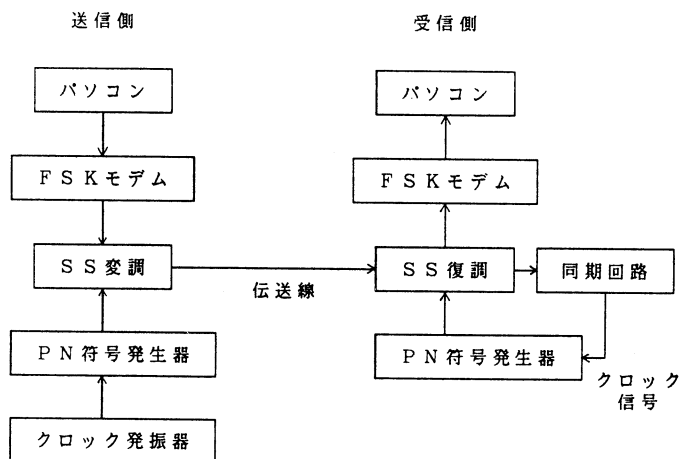


図-4 システム構成図

表-1 実験システムの仕様

項 目	仕 様
使用パソコン	富士通 FM-11AD2
端末インターフェイス	RS-232C 準拠
変調方式	DS 方式 一次変調/FSK 変調 二次変調/二相位相変調
伝送速度	1200bps
伝送形態	単方向通信
符号クロック周波数	223.721KHz
使用 PN 符号系列	5～15次 M 系列
同期方式	DLL 方式

Shift Keying) モデムにより、マーク時1200Hz、スペース時2200HzのFSK信号に変調される。FSKモデムにはモデム用IC・Am7910 (Advanced Micro Devices 社)を使用した。図-5にFSKモデム周辺の回路図を示す。

二次変調では一次変調された信号を二相平衡変調器により、PN符号を掛け合わせることで信号のスペクトラムを拡散させる。平衡変調器にはLM1496を使用した。このICは、マルチプライヤ型ICで例えばAM変調の場合、キャリア周波数で10MHzまでフラットなのが特徴である。

PN符号には、N次のシフトレジスタに適切なフィードバックをかけたときに発生する最大符号長系列、M系列符号を使用した。PN符号発生器のクロック信号には、3.579545MHzの水晶発振器を用い、これを分周してクロック周波数を223.721KHzとし、M系列符号の次数は5次～15次で使用した。図-6に平衡変調器の回路構成を示す。

3.3 受信側の構成

受信されたSS信号の復調は、二次変調の復調と一次変調の復調との2段階に分けて行われるのが普通である。二次変調、つまりSS変調の復調は、受信側で発生させたPN符号とSS信号との相関をとることで、広帯域に拡散された信号から、狭帯域の情報信号に逆拡散を行う。本システムでは相関器は、直接拡散変調器と全く同様の動作をする、インライン型相関器とした。実際の回路は、送信側の平衡変調器と同様にLM1496による平衡変調回路を使用した。この平衡変調器の回路は、入力インピーダンスが低いため、入力段にバッファアンプとしてLM318による非反転アンプを付加した。

逆拡散された信号は帯域通過フィルタ (BPF) を通して、雑音成分を取り除いた後に一次変調

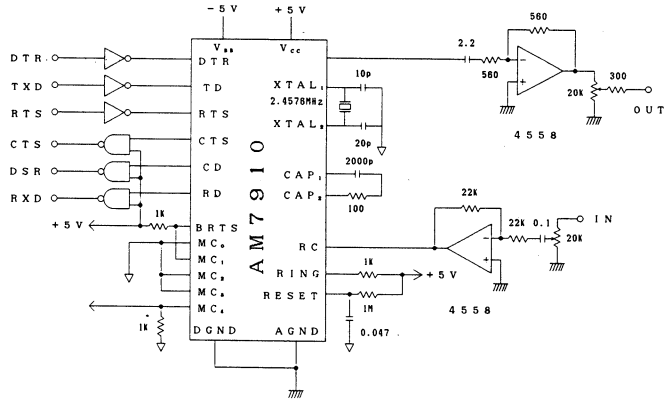


図-5 FSKモデムとその周辺部

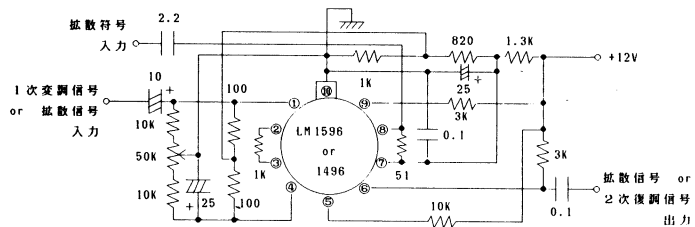


図-6 平衡変調器

が復調（ベースバンド復調）され、情報が取り出される。本システムでは、FSK モデムにより FSK 信号の復調が行われ、デジタルの情報信号となる。情報信号は RS-232C インターフェイスを介して受信側パソコンへ取り込まれる。

3.4 同期回路

(1) 同期回路の構成

図-7 に同期回路にブロック図を示す。この同期回路の構成は DLL による拡散方式をとってお

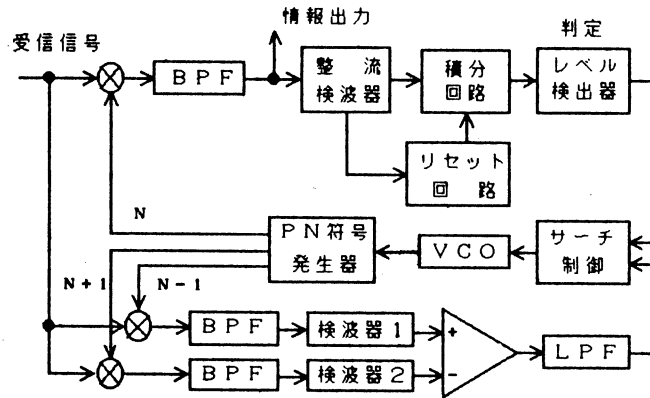


図-7 同期回路構成図

り、同期捕捉部と同期追跡部の二つの部分から成っているものである。同期捕捉部分は、スライディング相関方式を用いたもので、相関器の出力をベースバンド信号の帯域である1.2KHz～2.2KHzの帯域を通す中間周波数1.7KHz、帯域幅1KHzの帯域通過フィルタに通した後に、ダイオードによる整流検波を行って、振幅成分を取り出す。この信号を積分回路により一定時間積分し、スレシホールド検出器により信号のレベル判定を行う。この際、相関器に inputs する受信側 PN 符号発生器のクロック周波数を、送信側のクロック周波数より故意に少しだけずらすことで両方の PN 符号系列の相対位相をずらし、サーチを行う。符号系列の位相が合うと、大きな相関出力が得られるため積分器の出力がスレシホールド・レベルを越えることになる。このレベル検出信号により、クロック周波数を送信側と同じ周波数にしてサーチを停止する。受信側クロック発振器には VCO を用い、VCO の制御電圧をロック時には送信側のクロック周波数と同じ周波数になるように電圧を設定し、サーチ時にはロック時より制御電圧が高くなるようにして、クロック周波数をオフセットさせている。同期捕捉部の回路図を図-8 に示す。

VCO には、MC4024 を水晶振動子 (3.579545MHz) と組み合わせて使用した。

同期捕捉部で符号系列の位相同期が確立される訳であるが、そのままでは送・受信両方のクロック周波数が全く同じ周波数を保ち続けることは難しくクロック信号の位相がずれていくので同

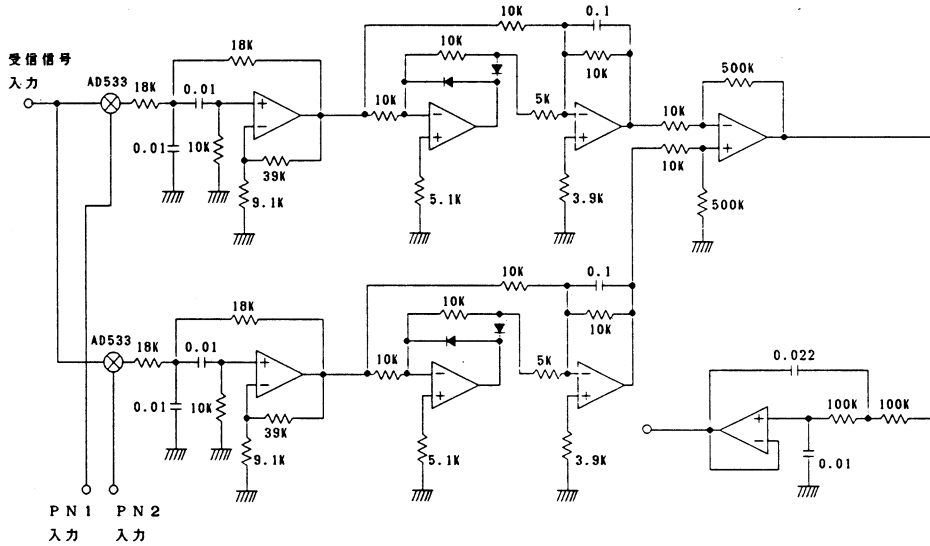


図-9 同期追跡部の回路図

追跡部の回路図を図-9に示す。

(2) 同期捕捉時間

スライディング相関方式による同期捕捉にかかる時間の理論値について考えてみる。サーチ時のクロック周波数を f_s 、ロック時のクロック周波数を f_o で表すと、サーチ速度は、 $|f_s - f_o|$ である。これは1秒間にサーチできるPN符号系列のビット数を表している。同期捕捉には最大で一周分サーチする必要があるので、PN符号系列の長さを $m = 2^n - 1$ とすると、最大同期捕捉時間 t_m は、

$$t_m = m / |f_s - f_o| \quad (1)$$

で求められる。

又、サーチ速度は同期検出回路の立ち上がり時間よりも速いと判定ができなくなる為、最大のサーチ速度は、積分回路の時定数により制限されることになる。

(3) スレシホールド・レベルの設定

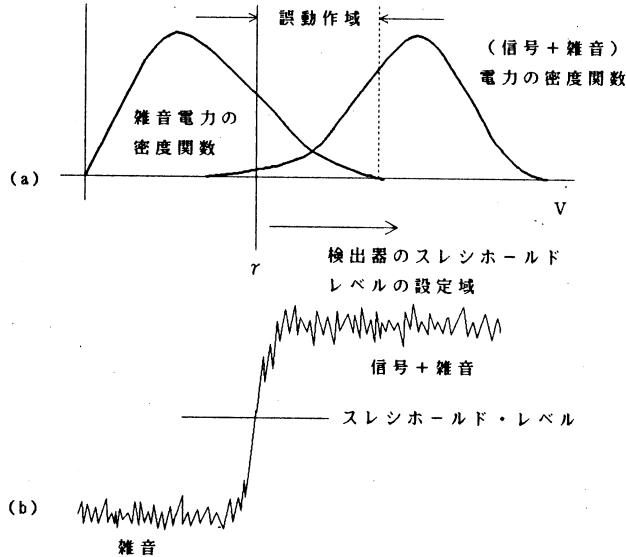
同期の検出の際に設定するスレシホールド・レベルと雑音レベル及び雑音+信号レベルの三者の関係を図-10に示す。

信号と雑音の密度関数及び検出器のスレシホールド・レベル γ が与えられると、この検出器の信号検出確率 P_d は、

$$P_d = \frac{\int_{\gamma}^{\infty} f(S+n) dV}{\int_0^{\infty} f(S+n) dV} \quad (2)$$

であたえられる。又、信号がなくても雑音によって同期を検出してしまいう同期誤り率 P_f は、

$$P_f = \frac{\int_0^\infty (\text{noise}) dV - \int_0^\gamma g(\text{noise}) dV}{\int_0^\infty g(\text{noise}) dV} \quad (3)$$



図—10 スレシホールド・レベルと信号及び雑音の関係

となる。

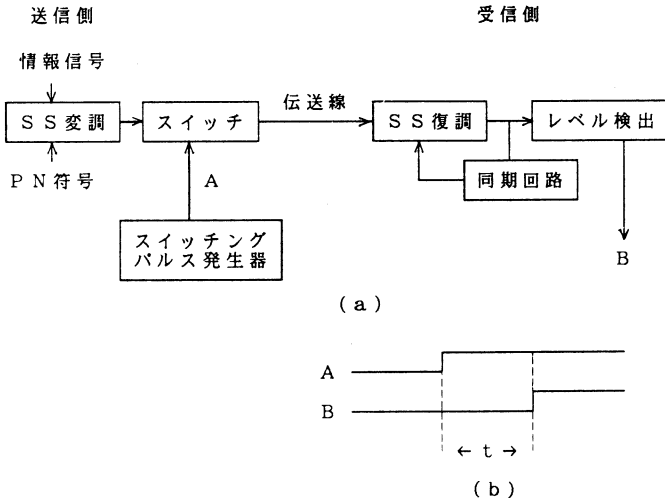
これらの式は、スレシホールド・レベル γ より大きい信号はスレシホールド検出器をトリガし、 γ より大きい雑音は誤動作を引き起こすことにより求めることができる。 γ の設定を低くすれば、信号密度関数のうち、スレシホールド・レベルを越える部分が増大し、同期検出の確率は高くなるが、その反面、スレシホールドを越える雑音も増大して、同期誤り率も高くなるのがわかる。

4. 実験方法及び結果

4.1 実験1：同期捕捉時間の測定

SS 信号が受信機に入力されてから、同期が捕捉されるまでの時間を測定する実験である。測定回路のブロック図を、図-11(a)に示す。

送信側の SS 信号の出力されるところにアナログ・スイッチを設けて、これを ON させることで信号を伝送線に出力する。アナログ・スイッチを ON・OFF させるための信号は、スイッチング・パルス発生回路から出力する。受信側で逆拡散された信号のレベルを検出することで同期が捕捉されたことを判定する。スイッチング・パルス A 、レベル検出器の出力を B とすると、 A 、



図—11 同期捕捉時間の測定回路

Bは図-11(b)のような関係の信号である。このAの立上からBの立上りまでの時間 t を、時間間隔測定のできるユニバーサル・カウンタ（TR-5766，タケダ理研）により測定した。このカウンタは10マイクロ秒～ 10^{-3} 秒の時間間隔の測定が可能である。情報信号は2.2KHzの正弦波信号とし、信号レベルは一定となる様にして、M系列符号の次数を5～15次までかえて測定した。これは、M系列符号の一周期の長さがかわることに相当する。測定値は10回測定して平均値をとったものである。測定結果を図-12に示す。

サーチを始める場所が同期点からどれだけ離れているかにより同期捕捉に要する時間が変わってくる。捕捉に失敗せずに一度で同期がとれるものと仮定すると、同期捕捉のためのサーチには最大で符号系列の一周期分をサーチする必要があるが、当然、M系列一周期の長さが長くなれば長くなるほど、同期捕捉時間は長くなる。実験結果にも測定回数が少なかったためか、多少のばらつきはあったが、この傾向がはっきりと現れている。M系列符号の代わりに1ビットの繰り返しパルスを使用した場合、サーチは1ビット以内となるので、最小の捕捉時間とすることができる。この時間の測定結果の平均値は、約1.36msとなり、この値を一周期分の長さ $m = 2^n - 1$ 倍すると、実験結果の値にそれぞれ近い値となる。この実験においてサーチ時の周波数は、約229KHzとなるように設定したがVCOの発振には水晶振動子を使用しているため、水晶の不安定領域で発振することになり、サーチ時の周波数は一定していないため、理論的に比較することができない。参考までに、サーチ時299KHzとしたときの最大同期捕捉時間の理論値を計算してみたところ、最大値であるにもかかわらず、実験値よりもかなり小さい値（9次の場合、実験値483.5ms、に対して理論値96.8ms）となってしまう。この原因としては、実験値にはサーチ速度

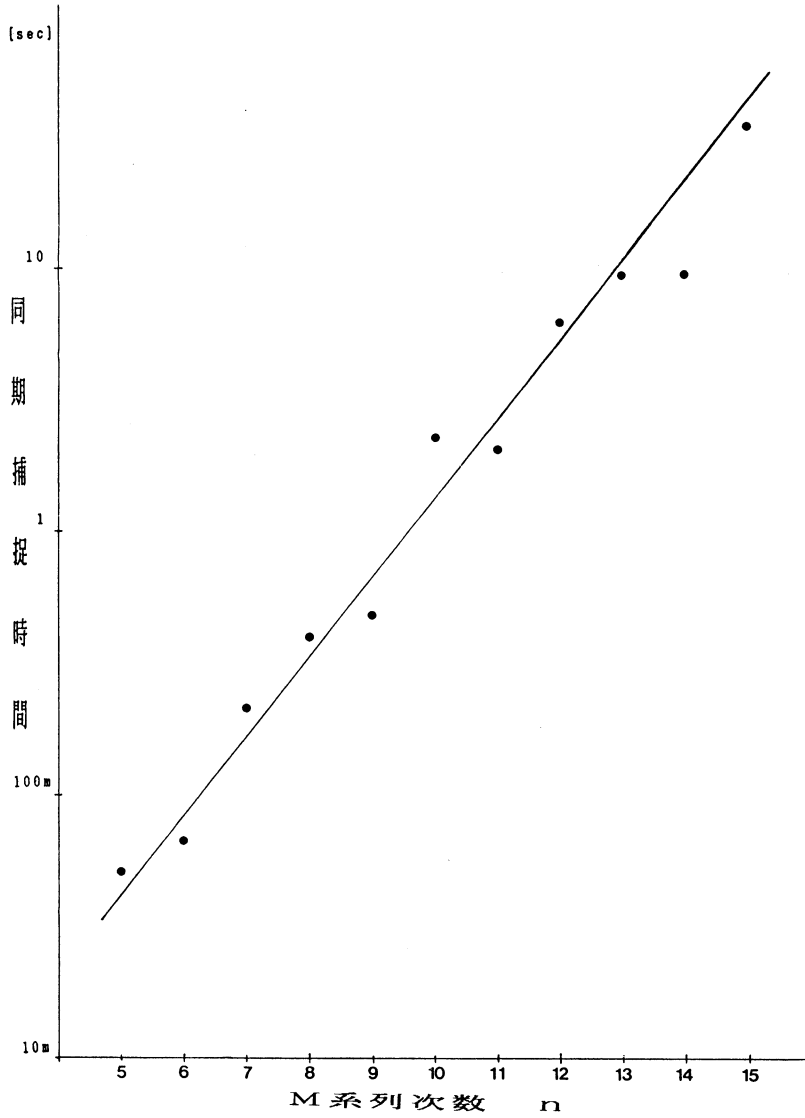


図-12 実験1 同期捕捉時間測定結果

が一定でないこと、フィルタや検波器、積分回路等での時間的な遅れが理論値には含まれていないこと、一度目のサーチで同期を捕捉できない場合があること等が考えられる。

4.2 実験 2：誤り率の測定

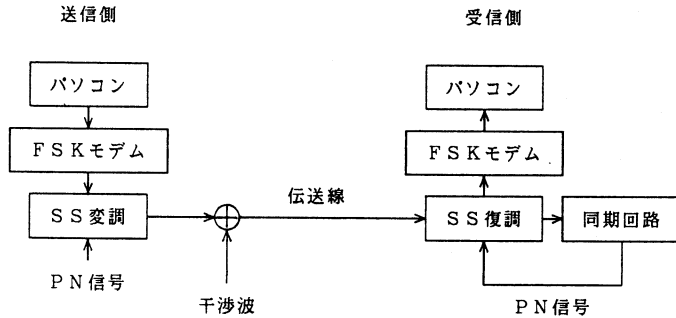


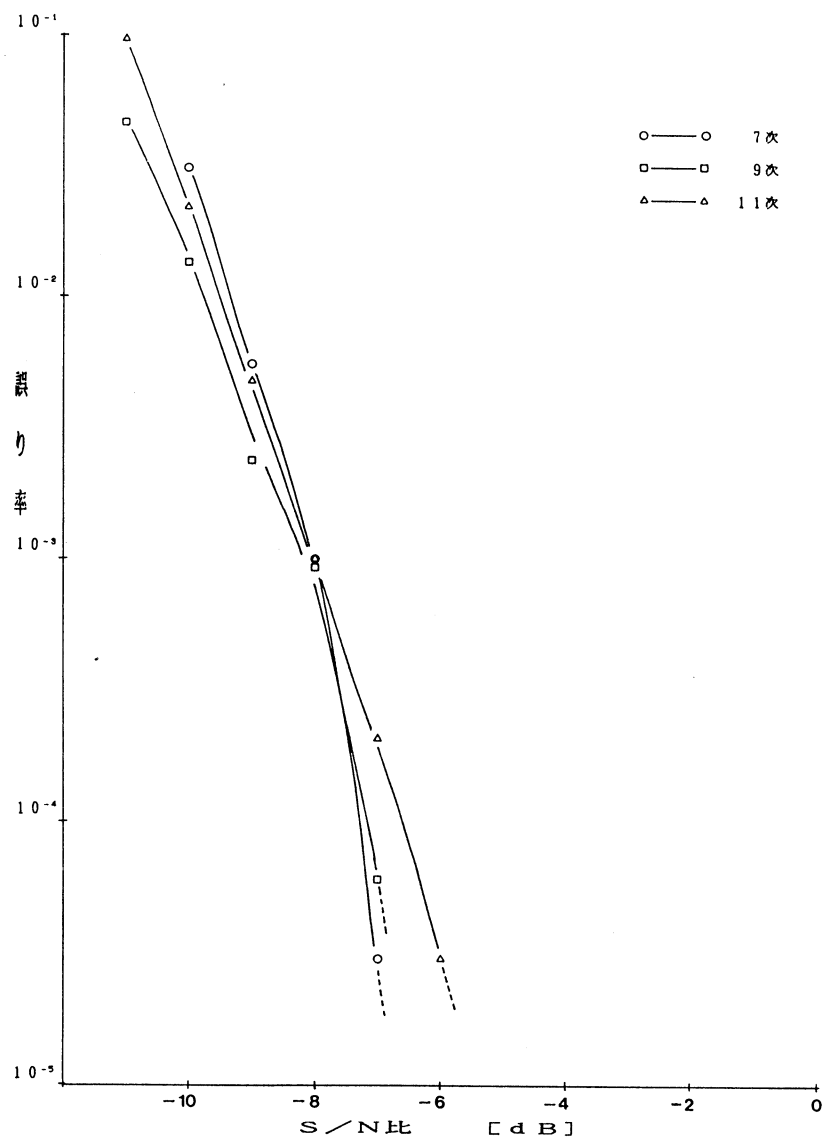
図-13 実験 2 回路構成図

図-13に示すように、送受信 1 組とし、伝送路に干渉波を加えて、伝送路における信号対雑音比に対する文字誤り率の測定を行った。

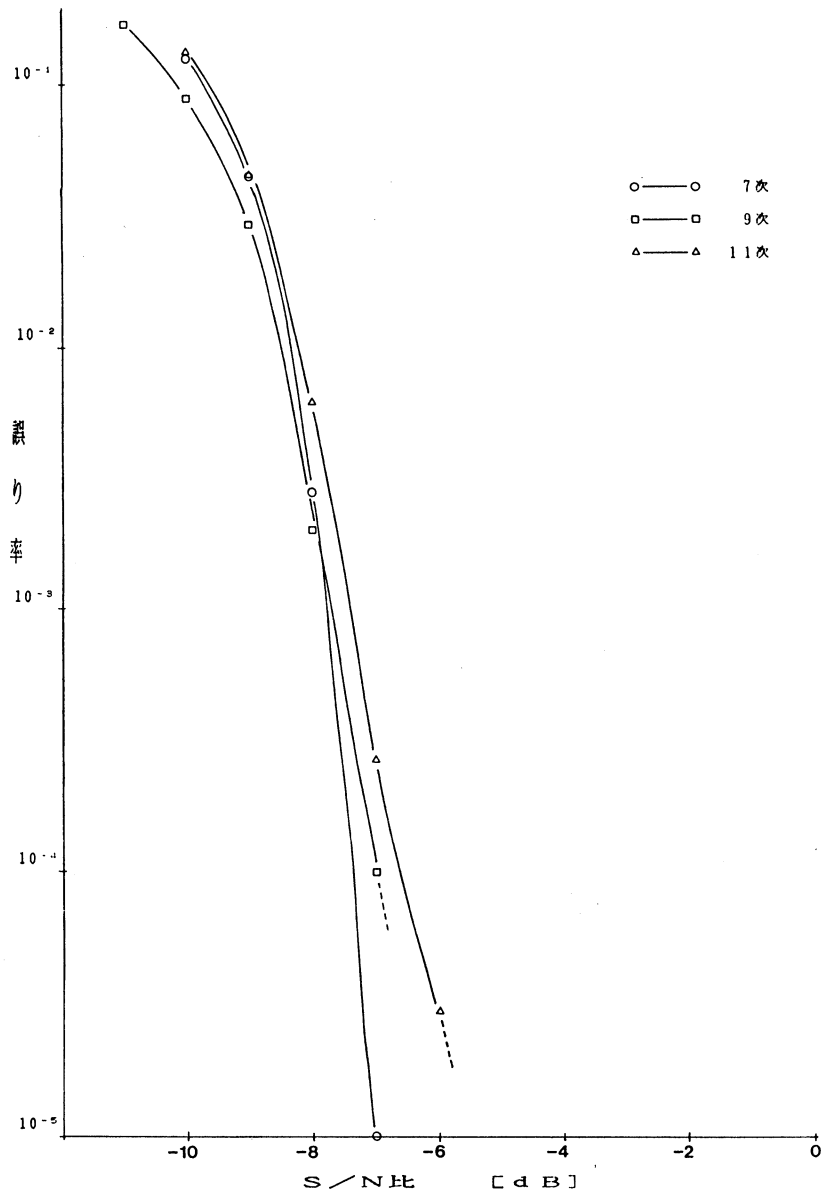
この際、送信信号出力は一定とし干渉波の大きさを可変して信号対雑音比を変化させた。伝送する情報は A～Z 迄の文字とし、10万文字送信した受信側で誤った文字の数を計数する方法で測定した。干渉波として、7 次 M 系列で 2.2KHz の正弦波信号を SS 変調したものを信号の大きさに変えて伝送路に挿入した。

図-14に実験結果を示す。同期回路を外した状態で PN 符号を送信側から受信側の SS 復調器に送り、同期のはずれがない状態にして同様の実験を行った。その結果を図-15に示す。

この実験の当初の目的としては、データを伝送し、誤り率を測定することで同期回路の追跡性能を調べ、雑音が増すと同期回路にどのような影響が出てくるかを見ることにあった。しかし、同期回路に影響が出てくる前に復調信号の雑音が多くなり、FSK の復調の際に、モデムにより誤った信号として受信されてしまう。同期回路をはずして受信側と同じ PN 符号系列を送り、同期のはずれが絶対に生じない状態で測定した結果が図-14である。同期回路を使用した場合の結果、図-14と図-15を比較してみると、僅かではあるが、同期回路を使用している場合の方が予想に反して雑音に対して強いという結果になっている。この原因について考えてみると、送信側で平衡変調されるとき、平衡変調器により出力信号の符号系列に立上りの遅れが生じ、送信側と同じ PN 符号を使用して復調すると遅れ部分の影響が出て、復調信号の雑音となる。一方、同期回路は送信側とは独立しているので、送信信号の符号系列との相関により位相を検出して、クロック信号の位相を最適に合わせるように努めるので、復調信号の雑音が多少改善されたのではないか



図一14 実験2 誤り率特性(1) 同期回路使用時



図—15 実験2 誤り率特性(2)

と考えられる。なお、図-14、図-15ともグラフには表示されていないが、 -5 dB 以上の S/N 比に対する誤り率はすべて 10^{-5} 以下である。

5. おわりに

本研究は、SS 通信方式におけるパソコン間データ通信のための同期回路として相関をとり位相を検出することによって同期をとる、スライディング相関及びDLL 方式についての研究を行ってきた。本システムにおいて、この方法を採用したのは、クロックを独立化した場合、符号系列間の位相を相関により検出する必要がある、スライディング相関は相関方式として構成が単純であり、またDLL による同期追跡は、現在では最も一般的なものとなっているもので、本システムだけでなく搬送波のあるものならば、帯域通過フィルタの中心周波数をかえることで、他のシステムにも利用が可能であると考えたからである。今回作製した同期回路により、ほぼ満足のいく安定な同期を得ることができた。しかし、まだ完璧なものとは言えず、いくつかの問題点がある。

まず第一に、同期の捕捉時間についてである。同期の捕捉時間は、使用するPN 符号系列の長さに大きくかかわってくるものであり、そのシステムでどのくらいの長さのPN 符号系列を使用する必要があるかが問題となる。今回の実験で使用したような短いPN 符号系列を使用する場合は、ほとんど問題はない。例えば、9 次のM 系列符号（長さ511ビット）の場合、実験値によると平均同期捕捉時間は約500msであり、通信を始める際の初期接続のため待ち時間としては、全く問題がないといってよい。しかし、短い符号系列を使用すると、妨害波との相互相関をとると反復性を持つ相互相関パターンが現れる可能性があり、信号の復調に際して同期の誤認やオフセットを生じさせることになる。又、使える符号数が少ないという問題も出てくるので、短い符号系列はあまり好ましくない場合がある。このような場合、長い符号系列を使用する必要があるが出てくるが、この同期回路のままでは時間がかかり過ぎるという問題が出てくる。この問題の解決法としては、プリアンブル符号等の同期のための短い符号を用いて、捕捉時間を短く抑える方法などがあげられる。

これに関連して、直接拡散方式における最も短い符号長は次の経験則により次のように求められる。

$$\frac{\text{符号ビット速度}}{\text{符号長}} < F_{\text{low}} \quad (4)$$

ここで、 F_{low} は復調信号に含まれる最低周波数である。即ち、符号の繰り返し速度が情報の通過帯域に落ち込んではいけないということを意味している。本システムにこれを当てはめると、符号の長さが約186ビットあれば良く、これは8次以上のM 系列であれば良いことになる。しかし実際には、チャネル数の問題も絡んでくるのであるべく長い符号を使用した方が良い。

第2に、多重化した場合に全ての局が独立にクロック発振器をもつ非同期システムにおいては、クロック周波数のずれが各局間にあたるため干渉波の影響が無視できない。このような他局間干渉は同期回路において相関特性に歪みを与え、位相誤差を与えるために同期がとりにくくなる可能性がある。

今後は、他局間干渉の除去に関する研究と並行して、より確実な同期回路に関する研究を行ないSS通信方式によるシステムの実用化を図らなければならない。

なお、本研究の遂行にあたり、ご協力いただいた松川昌章氏（現日立ビデオエンジニアリング株式会社）に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) R. C. Dixon 著, 立野敏, 片岡志津雄, 飯田清共訳: 最新スペクトラム拡散通信方式, JATEC 出版
- 2) John G. Proakis: Digital Communicatins, P. 554~P. 597, McGRAW-HILL Book Co. (1985)
- 3) R. L. Pikhnlitz, D. L. Schilling, L. B. Milstein: Theory of Spread Spectrum Communication-A Tutorial, IEEE Trans, CON-30, P. 884~P. 885 (1982)
- 4) Charles E. Cook, Fred W. Ellwesick, Laurence B. Milstein, Donald L. Schilling: Spread Spectrum Communications, IEEE PRESS
- 5) 広崎膨太郎: スペクトラム拡散通信の応用について, 電気学会誌, 105巻, 1号, p. 45~p. 49(1985)
- 6) 角川靖夫, 塚本賢一, スペクトラム拡散通信とその適用分野 I, 電子通信学会誌, Vol. 65, Vol. 9, p. 967~p. 971(1982)
- 7) 角川靖夫, 塚本賢一, スペクトラム拡散通信とその適用分野 II, 電子通信学会誌, Vol. 65, Vol. 10, p. 1053~p. 1059(1982)
- 8) 柏木潤: M 系列再発見, 計測と制御, Vol. 20, No. 2, p. 236~p. 245(1981)
- 9) 吉谷清登: PN 系列一特に M 系列について, 電波研究所季報, p. 249~p. 263(1971)
- 10) 帆保祐一, 黒島利一, 杉岡一郎, 秋山稠: 符号分割を用いたパソコン間多重データ通信について, 電気関係学会北海道支部大会248(1986)
- 10) 山田哲也, 黒島利一, 杉岡一郎, 秋山稠: SS 通信方式を用いたパソコン間データ通信について, 電気関係学会北海道支部大会247(1987)
- 12) B. P. Lathi 著, 中山惣之助, 宇佐見興一共著: 通信方式, マブロウヒルブック(1977)